

УДК 69.035.4

С.В. Кириченко

ОЦЕНКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО РИСКА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА

Рассмотрены современные методы строительства подземных хранилищ газа. Проведена оценка геомеханического риска, с целью уменьшения вероятности проявления неблагоприятных событий на стадии проектирования и строительства. Рассматривается оценка поведения соляного массива и его возможные типы дефектов.

Ключевые слова: подземное хранилище газа, выработки-емкости, подземные резервуары, каменная соль, соляная толща, геомеханический риск.

С каждым годом, потребление природного газа и нефти стремительно увеличивается. Неравномерный характер потребления газонефтепродуктов в условиях Российской Федерации объективно обусловлен географической обобщенностью районов добычи, переработки и их использования, совпадением по времени максимального спроса на топливо и на электро- и теплоэнергию, увеличением гарантированных экспортных поставок газонефтепродуктов, моральным и физическим старением существующих газонефтепроводов [1, 3].

Устойчивое и надежное функционирование топливно-энергетического комплекса оказывают подземные хранилища газообразных и жидких углеводородов. Создание хранилищ газообразных и жидких углеводородов должно производиться на основе новейших достижений науки и техники в этой области и с учетом обострения экологической ситуации окружающей среды. В наибольшей степени этим условиям отвечают подземные хранилища создаваемые в пористых, проницаемых

горных породах (для природного газа) и в отложениях каменной соли (для газов и жидкостей), которые обеспечивают лучшую защиту окружающей среды от вредного воздействия газонефтепродуктов, имеют высокую пожаровзрывобезопасность и защищенность от воздействия всех видов современного оружия.

Подземные хранилища газа (ПХГ) позволяют регулировать сезонную неравномерность потребления газа, снижать пиковые нагрузки, поддерживать гибкость и надежность поставок газа.

При проектировании подземных хранилищ (ПХ) учитываются следующие основные требования:

- сохранение качества продуктов при их непосредственно длительном контакте с горными породами;
- уравновешивание избыточного давления хранимых продуктов массивом пород при определенной глубине заложения выработки-емкости.

Методы сооружения выработок-емкостей зависят от механических, теплофизических, и химических свойств горных пород.

Горно-проходческими методами сооружают подземные резервуары в гипсе, доломите, известняке, мергеле, граните, гнейсе, вечномерзлых и других породах.

Строительство бесшахтных резервуаров осуществляется через буровые скважины методом растворения каменной соли.

Строительство подземных резервуаров методом камуфлетных взрывов возможно в пластичных глинистых породах в результате их уплотнения и упрочнения под действием взрывных волн и давления газов, образующихся при подземном взрыве.

Наиболее экономично и перспективно сооружение подземных резервуаров бесшахтным способом, когда в забое выработки отсутствуют люди и машины, а процессы выемки и транспортировки горной массы на поверхность осуществляется непрерывно. К числу таких методов относятся, прежде всего, физико-химические, когда свойства разрабатываемых средств определяют технологию их выемки, в частности, растворение пресной водой каменной соли через буровые скважины. Проблемы этого метода будут рассматриваться в данной научной статье.

Все существующие в мире подземные резервуары расположены в соляных толщах, залегающих, как правило, на глубинах 300-1400 м [3]. Обычно, по проекту сроком эксплуатации ПХГ является 50 лет. После этого периода производят реконструкцию, а если необходимо, ликвидацию или консервацию выработки-емкости. Причина этого заключается как в возможном нарушении устойчивости, так и в потери герметичности подземных выработок-емкостей.

Для хранилищ газонефтепродуктов, созданных в каменной соли, основным требованием является практическая непроницаемость породного массива. Проницаемость каменной соли настолько мала, что обеспечивает наилучшее создание герметичной каверны в отложениях каменной соли [1].

Расположение выработок-емкостей в плане осуществляется исходя из местных условий, удобства прокладки коммуникаций и т.п. При этом обязательно наличие барьерных целиков между подземными резервуарами и соседними горнодобывающими предприятиями, а так же целиков между подземными резервуарами. Величина целика между соседними выработками-емкостями по кратчайшему расстоянию между стенками должна соответствовать требованиям нормативной документации [4], а расстояние от стенки выработки-емкости до соседних скважин должно быть не менее 50 м.

Поведение выработок-емкостей может зависеть от следующих наиболее важных параметров [2]:

Геологическая обстановка определяет характер и тип горных пород в интервале расположения хранилища и в непосредственной близости к нему, сверху и снизу, а также начальное напряжение в этих осадочных породах до создания выработки-емкости. Мощность и однородность отложений, в которых находится хранилище, а так же выше- и нижележащих отложений требуется исследовать путем сплошного отбора кернового материала и анализа образцов пород;

Механических свойств горных пород. Необходимо определить наиболее важные механические свойства горных пород в интервале хранилища, а также непосредствен-

но выше и ниже его. К таким свойствам относятся: предел прочности на сжатие, ползучесть и другие характеристики.

Напряжений горных пород. Оценка напряжения горных пород в интервале расположения хранилища необходима для определения максимального рабочего давления.

Оценка поведения соляной толщи вокруг выработки-емкости состоит в выявлении потенциальных типов возможных дефектов вокруг выработки. К этим типам повреждения относятся следующие [2]:

Структурная неустойчивость выработки-емкости – этот тип повреждения вызывается значительной концентрацией напряжения вблизи стенок каверны, в результате чего происходит раздробление и/или отслаивание горной породы. В периоды отбора, когда давление внутри каверны снижается до минимального значения, происходит концентрация высоких напряжений. Чем ниже значение минимального давления в выработке и чем дольше это давление поддерживается, тем сильнее по характеру и интенсивности будет проявляться разрушение породы на стенах выработки. Если толщина раздробленной "корки" вокруг выработки равна или превосходит толщину непроницаемого покрытия на кровле или дне выработки, то хранящийся в подземном резервуаре продукт может стать гидравлически сообщающимся с проницаемым слоем выше или ниже соляных отложений. Во время закачки этого продукта под действием давления в выработки в частично или полностью разрушенном слое солей вокруг выработки развиваются высокие гидравлические градиенты, приводящие к значительным потерям продукта. Менее критическое явление, вытекающее из концентрации напряжения

вокруг выработки, заключается в частичном или локальном смятии кровли выработки при низком давлении в ней. Повторное смятие кровли выработки приводит к тому, что проблема (повреждение насосно-компрессорной трубы и необходимость их ремонта) сохраняется и фактически может привести к полному нарушению непроницаемого барьера в кровле.

Уменьшение вместимости подземного хранилища - второй тип повреждения, наблюдаемый в глубоких выработках-емкостях, эксплуатируемых "сухим" способом (без вытеснения солевым раствором). При этом отмечается постоянное уменьшение объема подземного хранилища в результате "оползания" (конвергенции) внутрь стенок выработки при снижении внутреннего давления на длительный период времени.

Концентрация высокого напряжения в непосредственной близости к стенкам выработки приводит к достижению предела текучести или к пластическому течению соляных материалов, что вызывает подвижку стенок выработки внутрь. При деформации соляного материала, первоначально находившегося в условиях высокого напряженного состояния, эти напряжения постепенно перераспределяются и воспринимаются более прочным, ограниченно развитым материалом на удалении от выработки-емкости, что обычно приводит к снижению скорости деформации или подвижки массы солей вблизи стенок выработки. Накопленная текучесть соляной толщи вокруг выработки приводит к заплыванию выработки внутрь. Потенциальное уменьшение объема подземного хранилища, связанное с подвижкой стенок выработки, может быть значительным и должно быть оценено.

Просачивание - третий тип повреждения, развивающийся в тех случаях, когда давление хранящегося продукта превысит минимальное напряжение в толще породы вокруг выработки. Высокое давление в выработке, может вызвать раскрытие существующих трещин в толще породы вокруг выработки (гидрораскрытие) или привести к образованию новых трещин в ней (гидроразрыв). Хранящийся продукт может мигрировать в проницаемые отложения выше или ниже интервала, в котором создано подземное хранилище. Просачивание может также развиться в выработке при пониженных рабочих давлениях, если пористая среда выше или ниже соляных отложений насыщена естественным солевым раствором под высоким давлением. При минимальных рабочих давлениях тонкие слои солей выше или ниже выработки могут быть подвергнуты гидроразрыву, в результате чего устанавливается гидравлическая связь между выработкой с низким давлением и насыщенным солевым раствором соседним горизонтом. По мере отбора хранящегося продукта выработкаемость постепенно заполняется солевым раствором.

Геомеханические риски описывают вероятность проявления неблагоприятных геолого-гидрогеологических условий при строительстве ПХ, приводящих к осложнениям при горно-строительных работах. При этом используются такие взаимосвязанные понятия как «вероятность», «риск», «неопределенность». «Вероятность» - это возможность реализации благоприятных геолого-гидрогеологических условий при строительстве ПХ. Тогда как «риск» - набор - это мера опасности того, что эти благоприятные условия не

реализуются. Эти величины измеряются в долях единицы.

$$R = 1 - P_{\text{ПХ}}, \quad (1)$$

где R – геомеханический риск создания ПХ; $P_{\text{ПХ}}$ – вероятность выявления в пределах объекта перспективного участка для строительства ПХ.

Понятие «неопределенность» описывает ситуацию, при которой ожидаемый результат не может быть предсказан точно, потому что существует целый ряд возможных результатов.

Геомеханический риск и обратная ему величина – вероятность – обусловлены неопределенностями геологического строения исследуемой территории и историей ее формирования. Источники неопределенности разнообразны: неполнота информации, погрешности различного рода определений. Чем сложнее геология и меньше изученность, тем больше неопределенности и, соответственно, тем больше геомеханические риски. Поэтому правильность оценки рисков зависит от наличия, полноты и достоверности данных, на основе которых выполняется этот анализ.

В таблице приводятся рискообразующие факторы и необходимые параметры (условия) для создания подземного хранилища газа в каменной соли.

Оптимальным путем решения по оценке геологической информации можно считать комбинированный подход, сочетающий в себе и качественную и количественную оценки.

В ходе проведения работ по оценке рисков предлагается использовать метод экспертных оценок в сочетании с количественными методами оценки и обработки данных.

Согласно такому подходу вероятность выявления в пределах соленосного бассейна участка благоприятного

Рискообразующий фактор	Необходимые параметры
1. Неблагоприятные условия соляной залежи, пригодной для создания ПХ	<ul style="list-style-type: none"> - Глубина залегания соляной залежи (приемлемый интервал 400-1500 м); - Мощность каменной соли (≥ 40 м); - Размеры площадки ПХ, в пределах которой соль залегает на приемлемой глубине
2. Нарушение устойчивости и герметичности подземных выработок	<ul style="list-style-type: none"> - Приемлемые физико-механические свойства каменной соли ; - Приемлемые физические свойства пород, вмещающих соляную залежь; - Отсутствие прослоев калийно-магниевых и других легко растворимых солей; - Отсутствие несолевых прослоев мощностью $\geq 2,5$ м; - Содержание в соли рассеянных нерастворимых пород не более 20 %; - Отсутствие в соляной залежи тектонических нарушений; - Приемлемая сейсмичность территории (≤ 9 баллов); - Отсутствие физико-геологических, криогенных и техногенных процессов
3. Возможность технического водоснабжения площадки ПХ из подземных водоносных горизонтов (в случае отсутствия поверхностных источников водоснабжения)	<ul style="list-style-type: none"> - Водообильность водоносного горизонта; - Минерализация подземных вод (≤ 20 г/л); - Отсутствие негативного воздействия на водохозяйственную обстановку при водозаборе
4. Возможность удаления строительного рассола с площадки ПХ в глубокие поглощающие горизонты (в случае отсутствия других способов утилизации рассола)	<ul style="list-style-type: none"> - Изолированность поглощающего горизонта от эксплуатируемых или пригодных к хозяйственному использованию водоносных горизонтов; - Площадь распространения и емкостные свойства поглощающего горизонта; - Коллекторские свойства поглощающего горизонта; - Минерализация подземных вод (≥ 30 г/л)

для строительства подземных резервуаров в каменной соли определяется с помощью коэффициентного анализа.

Сущность данного метода заключается в выполнении количественной оценки по каждому рискообразующему фактору на основе предварительного качественного анализа информации.

Работа ведется по шаблону, выполненному в виде таблицы, где ключевые рискообразующие факторы выбраны применительно к требованиям, предъявляемым к геолого-гидрогеологическим условиям участков строительства подземных хранилищ согласно строительным нормам.

Для каждого фактора подбирается несколько наиболее влияющих параметров, по которым в комплексе и оценивается вероятность получения благоприятных условий.

Первоочередным рискообразующим фактором является неблагоприятные условия соляной залежи пригодной для создания ПХ. А основные параметры, по которым выполняется оценка пригодности соли, это - глубина залегания соляной залежи, ее мощность и площадные размеры.

По имеющимся данным сейсморазведки, бурения скважин, структурных построений экспертом выполняется качественный анализ информации, на основе которого по рассматриваемому фактору определяется коэффициент в виде вероятности реализации благоприятных условий для строительства ПХ (от 0 до 1).

Аналогичный анализ проводится для всех имеющихся рискообразующих факторов. По исходным значениям параметров выполняется оценка

вероятности получения характеристик, удовлетворяющих предъявляемым требованиям.

Итоговое значение вероятности создания ПХ является произведением этих составных вероятностей.

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4, \quad (2)$$

где P_1 – вероятность неблагоприятных условий соляной залежи пригодной для создания ПХ; P_2 – вероятность нарушения устойчивости и герметичности подземных выработок; P_3 – вероятность обеспечения технического водоснабжения; P_4 – вероятность наличия пласта-коллектора пригодного для утилизации рассола.

Тогда геомеханический риск составит:

$$R = 1 - P, \quad (3)$$

где P – итоговая вероятность.

Рассчитанная таким образом величина геомеханического риска позволяет оценить целесообразность постановки дальнейшего развития геологоразведочных работ по созданию ПХ на изучаемом объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казарян В.А. Подземное хранение газов и жидкостей. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2006. – 432 с.
2. Gabriel Fernandez. Rock mechanics for underground storage. – SMRI-Fall Meeting, Hannover, Germany, 1994;
3. Смирнов В.И. Строительство подземных газохранилищ: Учебн. пособие для вузов. – М.: Газоил пресс, 2000. – 250 с.: ил.;
4. СП 34-106-98. Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Кириченко Сергей Владимирович – аспирант кафедры СПСиШ, ksv123@mail.ru
Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru

